

## УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ ПУЧКА БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ С СЕТОЧНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАТОДОМ

В.В. Недошивин, М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, Е.Х. Бакшт  
*Институт сильноточной электроники СО РАН,  
пр. Академический 2/3, Томск 634055, Россия,  
nedoshivin\_vlad@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru, koval@opee.hcei.tsc.ru,  
doroshkevich@opee.hcei.tsc.ru, beh@loi.hcei.tsc.ru*

Используя преимущество большинства источников электронов с сеточной (слоевой) стабилизацией границы эмиссионной (катодной) плазмы, связанное с несущественной зависимостью параметров генерируемого электронного пучка друг от друга (энергии электронов, амплитуды тока пучка, длительности и частоты следования импульсов) в ускорителе электронов с широкоапертурным (750×150 мм) катодом продемонстрирована принципиальная возможность прогнозирования энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу через тонкую металлическую фольгу. Энергетические спектры получены при разных ускоряющих напряжениях (110–160 кэВ). Показано, что в условиях эксперимента форма энергетического спектра слабо зависит от рабочего давления газа в ускоряющем зазоре ускорителя, а расширение спектра, прежде всего, связано с рассеянием пучка в выводной фольге и воздухе атмосферного давления. Показано, что контролируемое изменение ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка, выведенного в атмосферу, приводит к прогнозируемому расширению его энергетического спектра и смещению его максимума в область меньших энергий, что крайне важно для моделирования процессов воздействия таких пучков на различные органические объекты.

**Ключевые слова:** электронный пучок; эмиссионная плазма; сеточный плазменный катод; энергетический спектр.

## CONTROL OF THE ENERGY SPECTRUM OF A LARGE CROSS-SECTION BEAM GENERATED IN AN ELECTRON ACCELERATOR WITH A GRID PLASMA CATHODE

V.V. Nedoshivin, M.S. Vorobyov, N.N. Koval, S.Yu. Doroshkevich, E.Kh. Baksht  
*Institute of High Current Electronics SB RAS,  
2/3 Akademicheskoy Ave., 634055 Tomsk, Russia,  
nedoshivin\_vlad@mail.ru, vorobyovms@yandex.ru, koval@opee.hcei.tsc.ru,  
doroshkevich@opee.hcei.tsc.ru, beh@loi.hcei.tsc.ru*

Using the advantage of most electron sources with grid (layer) stabilization of the boundary of the emission (cathode) plasma, associated with the possibility of weakly dependent change in the parameters of the generated electron beam on each other (electron energy, beam current amplitude, duration and pulse repetition rate) in an electron accelerator with such a wide-aperture (750 × 150 mm) cathode, the fundamental possibility of predicting the energy spectrum of the electron beam extracted into the atmosphere through a thin metal foil is demonstrated. The energy spectra were obtained at different accelerating voltages (110–160 keV). It is shown that under the experimental conditions, the shape of the energy spectrum weakly depends on the working gas pressure in the accelerating gap of the accelerator, and the spectrum expansion is primarily associated with beam scattering in the output foil and air at atmospheric pressure. It is shown that a controlled change in the accelerating voltage during a beam current pulse emitted into the atmosphere leads to a predictable expansion of its energy spectrum and a shift of its maximum to the region of lower energies, which is extremely important for modeling the processes of the impact of such beams on various organic objects.

**Keywords:** electron beam; emission plasma; grid plasma cathode; energy spectrum.

## Введение

Перспективность использования ускорителей электронов с выводом пучка в атмосферу уже неоднократно продемонстрирована [1-3]. В ряде работ показано [4, 5], что при прохождении пучка через фольгу и слой воздуха атмосферного давления происходит расширение энергетического спектра электронного пучка.

Широкий энергетический спектр пучка в атмосфере может быть полезен в ряде применений, например, полимеризация лаковых покрытий [6, 7] и др. Широкий спектр электронного пучка позволяет проводить более эффективную модификацию (полимеризацию) поверхностного слоя за счет различной глубины проникновения ускоренных электронов пучка вглубь лакового покрытия.

Целью настоящей работы являлось измерение суммарного энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, используя широко-апертурный ускоритель электронов с сеточным плазменным катод на основе дугового разряда низкого давления, с учетом изменения ускоряющего напряжения на высоковольтной конденсаторной батарее в течение импульса тока пучка.

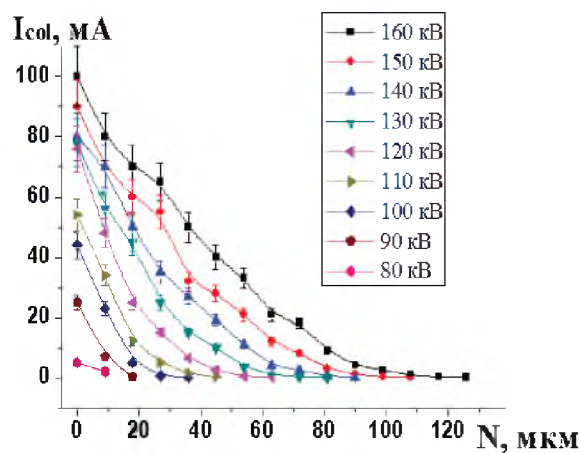
## Эксперимент и результаты

Эксперименты проводились на экспериментальном стенде [8]. Данный ускоритель электронов позволяет формировать электронный пучок с параметрами: энергия электронов (100-200) кэВ; амплитуда тока пучка в атмосфере (5-30) А; длительность импульсов тока пучка (10-100) мкс; частота следования импульсов (1-50) с<sup>-1</sup>; размеры пучка 750×150 мм.

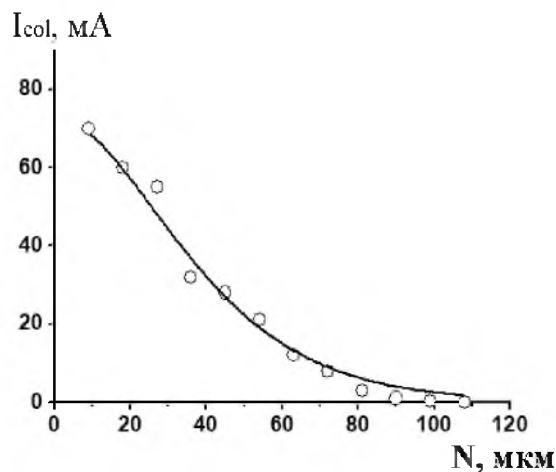
Измерение энергетического спектра электронного пучка, выведенного в атмосферу, осуществлялось так называемым методом фольг [4]. Квазипрямоугольная форма тока  $I_0$  приводит к линейному уменьшению ускоряющего напряжения, а,

следовательно, к уменьшению начальной энергии электронного пучка, также изменяющейся по линейному закону.

На рис. 1 приведены кривые ослабления тока пучка при различных ускоряющих напряжениях.



(а)

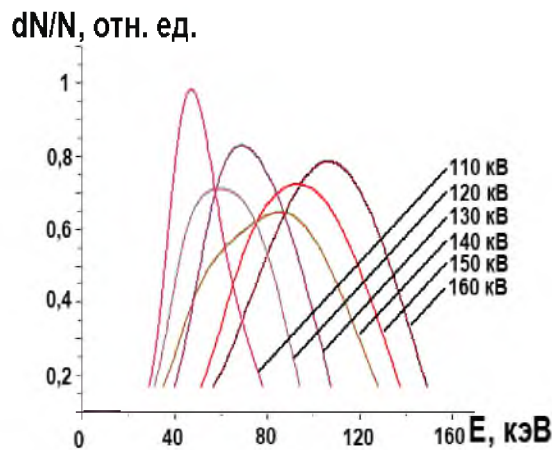


(б)

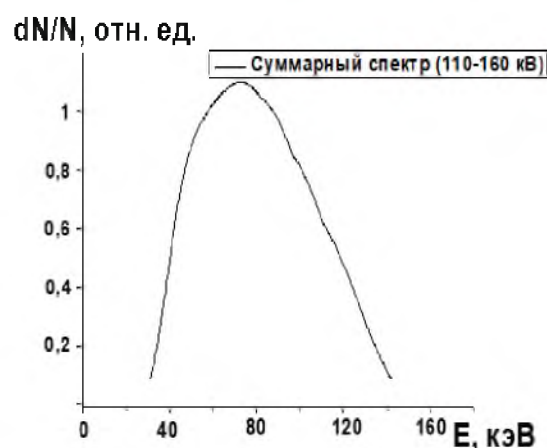
Рис. 1. Кривые ослабления тока пучка на коллектор  $I_{col}$  в зависимости от толщины фольги фильтра  $N$  при разных ускоряющих напряжениях (а). Экспериментальная (точки) кривая ослабления электронного пучка в тонких металлических фольгах и расчетная кривая ослабления (линия), полученная на основе рассчитанного энергетического спектра пучка при ускоряющем напряжении  $U_0=150$  кВ (б)

Для каждой экспериментальной кривой ослабления тока пучка, приведенных на рис. 1, строились соответствующие спектры и расчетные кривые ослабления тока пучка, пример которой представлен на рис. 2. Восстановленные энергетические спектры пучка, полученные при

различных ускоряющих напряжениях, представлены на рис. 2а. При снижении ускоряющего напряжения происходит смещение максимума спектра в область более низких энергий.



(а)



(б)

Рис. 2. Энергетические спектры электронного пучка, выведенного в атмосферу, снятые при различных ускоряющих напряжениях (а) и суммарный энергетический спектр электронного пучка, выведенного в атмосферу, при изменении ускоряющего напряжения за длительность импульса тока пучка со 160 кВ до 110 кВ (б)

Суммарный энергетический спектр электронного пучка, представленный на рис. 2б, был получен путем сложения

спектров, полученных для различных ускоряющих напряжений в диапазоне от 110 до 160 кВ. Условия эксперимента: выводная фольга АМГ-2н толщиной 30 мкм, расстояние от фольги до коллектора 15 мм.

### Заключение

При использовании метода регуляризации Тихонова была решена задача восстановления энергетического спектра импульсно-периодического электронного пучка, выведенного в атмосферу через тонкую металлическую фольгу, используя ускоритель электронов с сеточным плазменным катодом. Показано, что за счет изменения ускоряющего напряжения в течение импульса тока пучка возможно контролируемое расширение его энергетического спектра.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (номер: FWRM-2021-0006).

### Библиографические ссылки

1. Bugaev S.P., Kreindel Yu.E., Schanin P.M. Large section electron beams. 1984. Moscow, EAI: 112 p.
2. Sokovnin S.Yu. Nanosecond electron accelerators and radiation technologies based on them. 2007 Yekaterinburg, UD RAS: 224 p.
3. Rostov V.V., Alekseenko P.I., Vyhodtsev P.V., Shteinle A.V., Mazin V.I. *Siberian medical journal* 2012; 27(1): 141.
4. Kozyrev A.V., Kozhevnikov V.Yu., Vorobyov M.S., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Koval N.N., Tarasenko V.F. *Laser and Particle Beams* 2015. Cambridge University Press. 0263-0346/15.
5. Grigor'ev Yu.V., Stepanov A.V. *Prib. Tekh. Eksp.* 1982; (5): 124.
6. Burlant W. and Hinsch J. *J. Polim. Sci. A* 1965; (3): 3587.
7. Abdullin E.N. and Chmukh V.N. *High Energy Chem.* 1979; 13 (2): 181.
8. Vorobyov M.S., Koval N.N., and Sulakshin S.A. *Instr. and Experim. Tech.* 2015; 58(5): 687.